ROMANIA
RENEL
REGIA AUTONOMA DE ELECTRICITATE

CENTRUL DE FORMARE PROFESIONALA

Vasile TUDORA

STABILITATEA FUNCTIONARII SISTEMELOR ELECTROENERGETICE

AMat2 - 1

1997

STABILITATEA IN FUNCTIONARE A SISTEMELOR ELECTROENERGETICE

Stabilitatea functionarii sistemului energetic consta in posibilitatile de care dispune sistemul, ca in cazul aparitiei unor perturbatii, sa poata asigura valori acceptabile ale frecventei si tensiunii in nodurile sale si sa nu intrerupa alimentarea consumatorilor.

Stabilitatea sistemelor energetice se examineaza sub doua aspecte: stabilitatea statica si stabilitatea dinamica.

1. Stabilitatea statica

Prin stabilitate statica se intelege capacitatea pe care o are un sistem energetic pentru ca in cazul unor perturbatii mici ale functionarii normale, sa poata reveni la situatia initiala, cind perturbatia a disparut sau sa gaseasca o noua situatie stabila de functionare daca perturbatia persista.

Consumul de energie variaza permanent ca urmare a cerintelor consumatorilor. Aceste cresteri sau scaderi ale puterii sint acoperite de centralele electrice functionind interconectate.

Capacitatea sistemului de a mentine o functionare stabila se poate analiza prin mai multe criterii, dar doua sint mai importante si in acelasi timp mai folosite.

Unul dintre acestea, se refera la analiza stabilitatii statice pornind de la legatura care exista intre puterile active debitate de centralele electrice si decalajul dintre vectorii tensiunii electromotoare a generatoarelor, denumit criteriul dP/ dδ; celalalt se bazeaza pe interdependenta intre puterile reactive si tensiunile la nodurile sistemului, denumit criteriul dQ / dU.

1.1. Analiza stabilitatii statice cu criteriul dP/ dδ

Se considera o centrala electrica, care debiteaza pe barele unei statii apartinind unui sistem de putere infinita (fig.1), caracterizat prin U_S = ct si reactanta sistemului dintre bara S si tensiunea electromotoare echivalenta a sistemului egala cu zero.

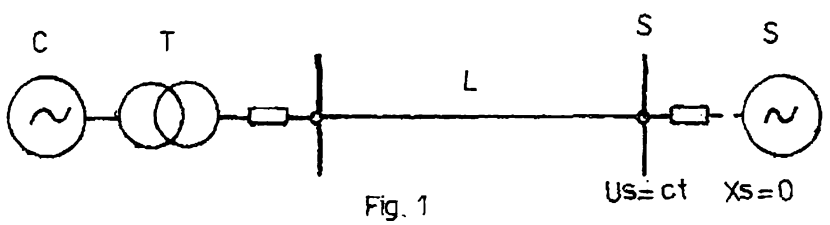


Fig. 1

In schema echivalenta (fig.2) se neglijeaza rezistentele elementelor, acestea fiind mult mai mici decit reactantele.

Marimile care intervin in schema echivalenta considerata pe o faza:

E_{df} – tensiunea electromotoare in spatele reactantei sincrone a generatorului X_d;

X_T si X_L – reactantele transformatorului echivalent si a liniei.

X_t - reactanța totală dintre centrală și barele sistemului: $X_t = X_d + X_T + X_L$

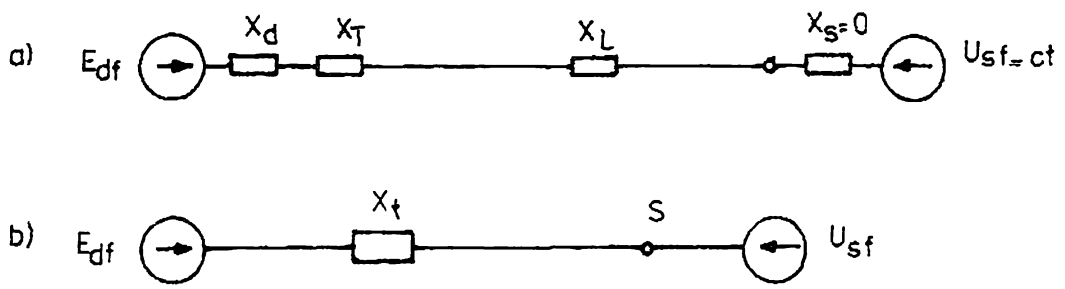
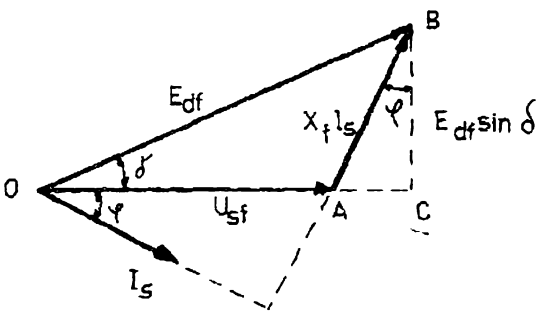


Fig. 2

Centrala C debiteaza in barele statiei sistemului puterea aparenta $P_S - jQ_S$ sau considerind pe o faza $P_f - jQ_f$, careia ii corespunde curentul Is decalat cu unghiul φ fata de tensiunea U_{Sf} (fig.3)



Puterea activa corespunzatoare unei faze $P_f = U_{sf} I_s \cos\varphi$,

sau in sistem trifazic: $P_s = \sqrt{3}\, U_s I_s \cos\varphi$

Intrucit s–au neglijat rezistentele, intre E_d (tensiunea electromotoare intre faze) si Us, pierderile de putere active sint zero, rezultind ca puterea activa P_s, care intra in nodul S, este egala cu puterea activa produsa de centrala C.

Din diagrama vectoriala (fig.3) rezulta

$X_t I_s \cos\varphi = E_{df} \sin\delta$, δ fiind unghiul dintre vectorii E_{df} si U_{sf}.

Inlocuind in expresia puterii

$$P_s = \frac{\sqrt{3}\, U_s E_{df}}{X_t} \sin\delta = \frac{U_s E_d}{X_t} \sin\delta$$

E_d – se considera ca ramine constanta, curentul de excitatie nu variaza.

U_s si X_t sint de asemenea constante.

Rezulta ca puterea activa care inta in S si care, asa cum s–a mentionat, este egala cu puterea produsa de centrala C, este o functie numai de unghiul δ, variind dupa o sinusoida (fig.4). Aceasta curba reprezinta caracteristica de putere activa a generatorului denumita si caracteristica interna.

Se considera ca la un moment dat generatorul debiteaza o putere activa P_o, careia ii corespund o putere mecanica la arborele turbinei P_{mo}, care se considera constanta, adica nu se modifica admisia aburului in turbina.

Paralela la axa Oδ corespunzatoare ordonatei P_o determina pe caracteristica de putere doua puncte de functionare; punct de functionare stabil fiind pe partea ascendenta – punctul a, caruia ii corespunde unghiul δ_a.

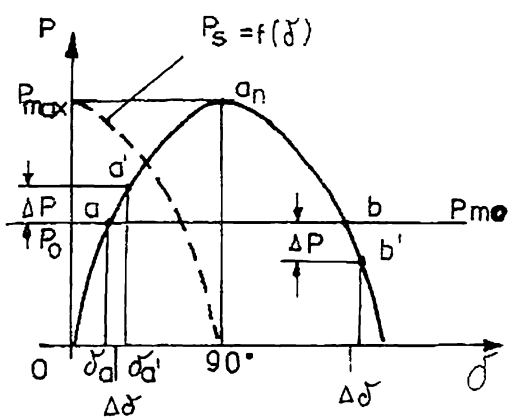


Fig. 4

Unei cresteri a unghiului δ cu $\Delta\delta$, punctul de functionare se stabileste in a' caruia ii corespunde o crestere a puterii active debitata de generator ΔP.

Intrucit puterea dezvoltata de motorul primar a ramas constanta, rezulta ca generatorul debiteaza o putere mai mare decit aceea pe care o primeste si ca urmare viteza rotorului scade (se frineaza). Odata cu aceasta scade si unghiul δ si punctul de functionare revine in punctul a (punctul in care $P_o = P_{mo}$)

In mod analog, se poate arata ca in cazul scaderii unghiului δ, puterea debitata de generator devine mai mica decit putereamecanica, ceea ce face ca rotorului sa fie accelerat; punctul de functionare revine in punctul a.

In ambele cazuri, se constata ca variatia unghiului δ are acelasi semn cu variatia puterii generatorului. Aceasta legatura intre variatiile $\Delta\delta$ si ΔP, care sint de acelasi semn se exprima prin relatia:

$$\Delta P / \Delta\delta > o$$

Trecind la punctul de functionare b, se considera ca unghiul a crescut cu $\Delta\delta$. Acestei cresteri, ii corespunde o reducere a puterii debitate de generator cu ΔP. In acest caz generatorul, debitind o putere mai mica decit puterea P_{mo} dezvoltata de motorul primar, se accelereaza, producind o noua crestere a unghiului δ. Aceasta conduce la o noua reducere a puterii debitate si astfel ambalarea rotorului continua pina cind generatorul iese din sincronism.

In cazul in care unghiul δ scade, puterea debitata de generator creste devenind mai mare decit puterea mecanica P_{mo} si rotorul se frineaza producind in continuare scaderea unghiului δ, pina cind punctul de functionare ajunge in a – punct stabil de functionare.

Punctul b este punct nestabil de functionare.

Se observa ca in acest caz variatiile ΔP si $\Delta\delta$ sint de sensuri contrare si relatia $\Delta P / \Delta\delta > 0$, nu mai este satisfacuta.

Trecind la limita, $\lim_{\Delta\delta \to 0} \frac{\Delta P}{\Delta\delta} = \frac{dP}{d\delta} > 0$, acesta reprezinta criteriul de examinare a stabilitatii statice.

Derivind expresia caracteristicii interne se obtine: $\frac{dP}{d\delta} = \frac{E_d U_s}{X_t} \cos\delta = P_s$

P_s – se numeste putere sincronizanta. Pentru ca stabilitatea functionarii sa fie asigurata trebuie ca $P_s > 0$, corespunzindu–i numai partea ascendenta a caracteristicii $P = f(\delta)$

Se constata ca pentru $\delta = 90^o$, $P_s = 0$, iar puterea debitata de generator este maxima, $P=P_{max}$. In acest punct, orice perturbatie care are ca urmare cresterea unghiului δ, conduce la iesirea din sincronism a generatorului.

Pentru ca punctul a' din fig.4, sa devina punct stabil de functionare (in ipoteza E_d = ct, regulatorul de tensiune nu functioneaza) trebuie sa se creasca admisia in motorul primar, astfel incit puterea mecanica sa creasca de la P_{mo} la P_{m1}, realizindu–se echilibrul intre puterea generatorului si puterea mecanica ($P_1 = P_{m1}$) si ca urmare unghiul δ creste la valoarea $\delta_{a1} > \delta_{a'}$

De pe caracteristica de putere, se constata ca puterea poate creste pina in punctul a_n, care corespunde unghiului de defazaj $\delta = 90^o$ si reprezinta puterea maxima ($\sin\delta = 1$)

Pentru ca functionarea generatoarelor conectate in paralel sa fie stabilita este necesar ca punctul de functionare sa fie suficient de departat de punctul limita a_n, pe partea ascendenta a curbei.

In acest sens se defineste coeficientul de stabilitate statica prin raportul dintre puterea maxima si puterea debitata (P_a)

$$K_s = \frac{P_{max} - P_a}{P_{max}} \times 100;$$

cu cit K_s este mai mare cu atit rezerva de stabilitate este mai mare. In mod obisnuit se lucreaza cu coeficienti K_s=15...20%

1.2. Influenta regulatoarelor de tensiune asupra stabilitatii statice dupa criteriul dP / dδ

Studiul stabilitatii statice fara functionarea regulatoarelor de tensiune s–a facut considerind ca in afara reactantei x, mai sint constante U_s (datorita puterii infinite a sistemului) si E_d (nu se modifica curentul de excitatie al generatoarelor), rezultind caracteristica de putere din fig.5 (sinusoida a)

De asemenea, s–a mentinut constanta tensiunea electromotoare E_d si in cazul cind s–a considerat ca puterea debitata creste de la P_a la P_{max}, odata cu cresterea admisiei, adica nu s–a variat curentul de excitatie prin interventia regulatorului de tensiune al generatorului.

In prezent, toate generatoarele, indeosebi cele de puteri mai mari (de exemplu peste 50 MW) sint prevazute cu regulatoare de tensiune, care, atunci cind variaza sarcina generatorului si odata cu aceasta si tensiunea la borne, intervin si modifica tensiunea electromotoare E_d actionind asupra curentului de excitatie pentru a mentine tensiunea la bornele generatorului cit mai aproape de valoarea nominala. Daca puterea debitata de generator creste si odata cu aceasta si puterea la arborele turbinei, in cazul in care nu intervine regulatorul de tensiune, tensiunea la bornele generatorului scade.

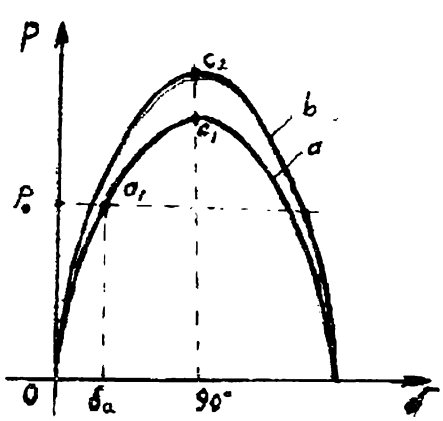


Fig 5

Interventia regulatorului in sensul mentinerii constante a tensiunii, determina cresterea curentului de excitatie, respectiv a tensiunii E_d (sinusoida b)

La reducerea sarcinii, regulatorul de tensiune actioneaza in sens invers reducind excitatia respectiv E_d, pentru a mentine

tensiunea la bornele generatorului constanta.

Se analizeaza primul caz, cel privind cresterea tensiunii E_d, care reprezinta importanta in studiul stabilitatii statice.

Daca E_d creste, caracteristica de putere va avea o valoare maxima mai mare decit in situatia initiala (fig.5 sinusoida b).

Pentru a examina influenta RAT asupra stabilitatii statice, consideram ca in starea initiala, caracteristica de putere este reprezentata prin sinusoida c; punctul de functionare fiind in a pentru care corespunde puterea debitata de generator P_0, puterea la arborele bobinei P_{mo} si o tensiune electromotoare E_{do} corespunzind un anumit curent de excitatie (fig.6)

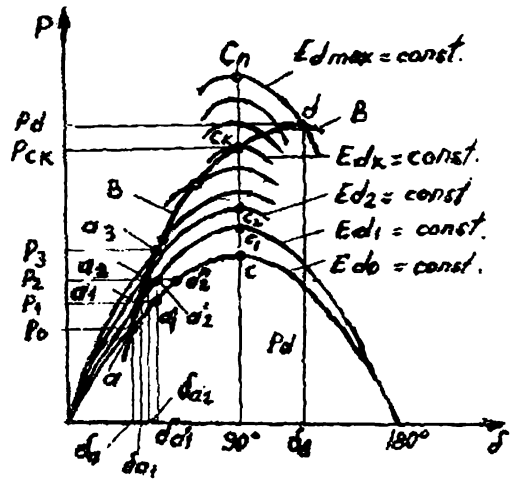


Fig.6

Crescind puterea generatorului pina la P_1 se constata ca daca curentul de excitatie ramine neschimbat, respectiv E_{do}=ct, (regulatorul de tensiune nu actioneaza) punctul de functionare trece din a in a'_1, caruia ii corespunde unghiul de defazaj $\delta_{a'1} > \delta_a$;

punctul de functionare a'_1 fiind mai aproape de valoarea maxima c, rezulta ca rezerva de stabilitate se reduce.

Prin interventia regulatorului de tensiune, pentru a mentine constanta tensiunea la bornele generatorului, care scade la cresterea puterii de la P_0 la P_1, se mareste curentul de excitatie si tensiunea electromotoare creste de la E_{do} la E_{d1}. Aceasta conduce la o noua caracteristica de putere E_{d1} = ct, a carei putere maxima $P_{c1} > P_c$

Punctul de functionare trece din a'_1 in a_1, caruia ii corespunde un unghi de defazaj $\delta_{a1} < \delta_{a'1}$ si rezerva de stabilitate creste.

Presupunind ca puterea creste in continuare de la P_1 la P_2, daca curentul de excitatie ramine neschimbat, punctul de functionare trece din a_1 in a'_2, caruia ii corespunde unghiul de defazaj $\delta_{a'2} > \delta_{a1}$, punctul de functionare a'_2 fiind mai aproape de valoare maxima c_1, rezerva de stabilitate se micsoreaza.

Prin interventia regulatorului de tensiune se mareste din nou curentul de excitatie rezultind o noua caracteristica de putere E_{d2} = ct, ($E_{d2} > E_{d1}$), a carei putere maxima $P_{c2} > P_{c1}$. Punctul de functionare trece din a'_2 in a_2 caruia ii corespunde unghiul de defazaj $\delta_{a2} < \delta_{a'2}$

Se constata ca ambele consecinte, respectiv cresterea puterii maxime si micsorarea unghiului de defazaj, conduc la imbunatatirea conditiilor de stabilitate statica.

Din cele prezentate mai sus, rezulta ca la cresterea puterii debitate de generator de la P_0 la P_1, P_2, etc. prin actionarea regulatorului de tensiune de fiecare data, rezulta caracteristici de putere E_{d1}=ct, E_{d2}=ct, etc. corespunzind defazaje δ_{a1}, δ_{a2}, etc. Din fig.6 se constata ca $\delta_a < \delta_{a1}$ si $\delta_{a1} < \delta_{a2}$, adica cresterea puterii debitate de generator, conduce si in cazul interventiei regulatorului de tensiune la cresterea defazajului δ, dar cresterea este mai lenta (in lipsa regulatorului unghiul de defazj creste de la δ_a la $\delta_{a''}$ pentru caracteristica E_{do}=ct, iar cu regulator, defazajul creste de la δ_a la δ_{a2} pe caracteristica E_{d2}=ct, δ_{a2} fiind mai mic decit $\delta_{a''2}$).

Unind punctele de functionare a_1, a_2 etc. corespunzator puterilor debitate $P_1 > P_0$, $P_2 > P_1$, etc, situate pe caracteristici de putere rezultate in urma actionarii regulatorului de tensiune pentru E_{d1} = ct, E_{d2} = ct, etc., iar $E_{d1} > E_{do}$, $E_{d2} > E_{d1}$, se obtine o noua curba B care este tot o caracteristica de putere numita caracteristica externa.

Aceasta caracteristica continua sa fie crescatoare pentru $\delta = 90^0$ (c_k), unghi caruia ii corespund puterile maxime pentru caracteristicile E_d=ct.

Maximul curbei B, punctul d, respectiv puterea maxima P_d, corespunde un defazaj mai mare de

90^0. Se remarca faptul ca acest punct se gaseste pe partea descendenta a caracteristicii interne E_{dn}=ct, care reprezinta zona punctelor de functionare instabila. Pentru ca punctele de functionare situate intre c_k si d sa fie stabile, este necesar ca regulatoarele de tensiune ale generatoarelor sa fie foarte rapide si foarte sensibile.

Zona de functionare peste $\delta = 90^0$ adica c_k si d se numeste zona de stabilitate artificiala.

Se considera numai zona c_k–d, in care punctul de functionare este in a. (fig.7).Daca intervine o perturbatie in sensul cresterii, punctul de functionare tinde sa se deplaseze in jos pe aceeasi caracteristica interna, generatorul se accelereaza devenind instabil ($P_m > P_e$).

Datorita interventiei rapide a regulatorului, curentul de excitatie creste si ca urmare si tensiunea electromotoare E_d si punctul de functionare trece de pe o caracteristica de functionare pe alta, corespunzatoare unei tensiuni electromotoare din ce in ce mai mari. Cresterea tensiunii electromotoare E_d, determina cresterea puterii electrice debitate de generator. Unghiul creste mai incet, trecind prin punctul b de functionare, punct in care $P_e = P_m$.

Crescind in continuare E_d, si corespunzator si P_e, generatorul se frineaza ($P_e > P_m$) si unghiul δ se micsoreaza. Regulatorul actioneaza in sensul micsorarii E_d. Daca perturbatia a disparut, dupa citeva oscilatii amortizate punctul de functionare revine in a. Amplitudinea oscilatiilor depinde de insensibilitatea regulatorului de tensiune, fiind cu atit mai mare cu cit aceasta este mai mare si amortizarea oscilatiilor dureaza mai mult.

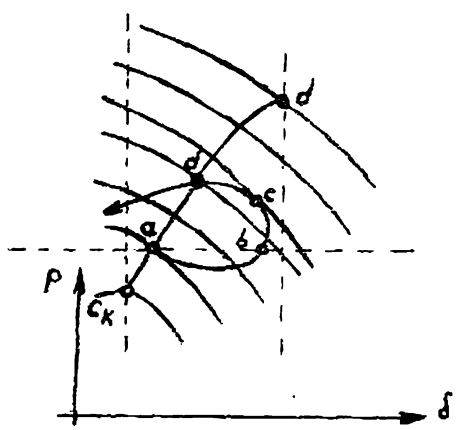


Fig.7

In timpul functionarii normale a generatoarelor, variatiile de sarcina sint frecvente, ceea ce conduce in cazul functionarii in zona de stabilitate artificiala, la solicitarea mare a regulatoarelor.

Din aceasta cauza, pentru a avea siguranta necesara in functionare se evita functionarea cu defazaje peste 90^0 , respectiv peste puterea P_{ck} (maximul puterii electrice pe caracteristica E_{dk}=ct)

Portiunea ascendenta c_k – d a caracteristicii externe este luata in considerare ca rezerva a stabilitatii statice.

1.3.Analiza stabilitatii statice cu criteriul dQ/dU

Acest criteriu se bazeaza pe legatura care exista intre circulatia puterii reactive si tensiunile din noduri.

Consumul de putere reactiva depinde de natura consumatorilor din fiecare nod si de variatiile de tensiune din nodul respectiv. Variatii mari ale tensiunilor, respectiv ale puterilor reactive pot produce perturbatii mari in sistem, cu consecinte asupra posibilitatilor de mentinere a stabilitatii in functionare. Pentru a stabili relatia dintre puterea reactiva si tensiune se considera schema din fig.8 care reprezinta un generator echivalent debitind printr–o linie intr–un nod al sistemului puterea reactiva Q_g.

In fig.9 este reprezentata diagrama vectoriala rezultata din schema echivalenta.

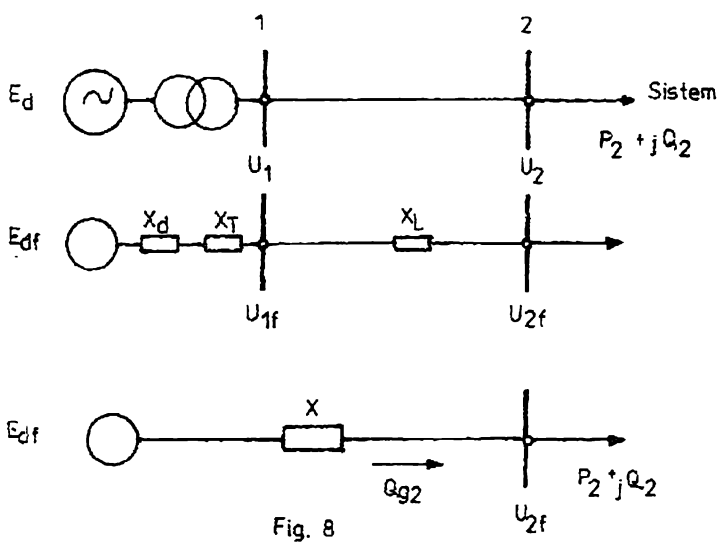


Fig. 8

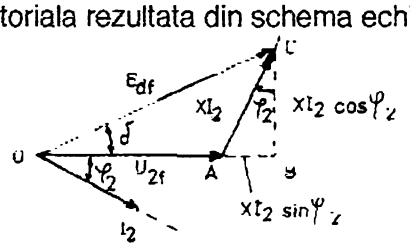


Fig. 9

$X = X_d + X_T + X_L$;

U_{1f} si U_{2f} – tensiunile pe faza in nodurile 1,2 ale sistemului

I_t – curentul din nodul 2

Din triunghiul OBC rezulta:

$Edf = \sqrt{(OA + AB)^2 + BC^2} = \sqrt{(U_{2f} + XI_2 \sin\varphi_2)^2 + (XI_2 \cos\varphi_2)^2}$;

sau tinind cont de relatiile puterii active si reactive, rezulta:

$$E_{df} = \sqrt{\left(U_{2f} + \frac{Q_2 X}{U_2}\right)^2 + \left(\frac{P_2 X}{U_2}\right)^2}$$

Din acelasi triunghi rezulta: $\operatorname{tg}\delta = \dfrac{XI_2 \cos\varphi_2}{U_{2f} + XI_2 \sin\varphi_2}$

In regim normal de functionare, considerind nodul 2, pentru o valoare admisibila a tensiunii U_2 respectiv U_{20}, se stabileste un echilibru intre puterea reactiva Q_{g2} care intra in nod, (debitata degenerator) si puterea Q_2 absorbita de consumatorii din nodul 2.

Punctul a, corespunzator acestui echilibru reprezinta intersectia a doua caracteristici: $Q_g=f_1(U)$ – curba de variatie a puterii reactive produse de generator care intra in nod, si $Q_c = f_2(U)$ – curba de variatie a puterii reactive absorbita de consumator din acelasi nod.

Stabilirea celor doua caracteristici se face dupa cum urmeaza:

– pentru $Q_g= f_1(U)$

Se tine seama de formula puterii reactive:

$$Q_{2g} = \sqrt{3}\, U_2\, I_2 \sin\varphi_2;$$

si din triunghiul OBC rezulta: $E_{df} \cos\delta = U_{2f} + XI_2 \sin\varphi_2$;

de unde: $I_2 \sin\varphi_2 = \dfrac{E_{df}}{X} \cos\delta \; \dfrac{U_{2f}}{X}$

si prin inlocuire se obtine $Q_{2g} = \dfrac{\sqrt{3}\, U_2\, E_{df}}{X} \cos\delta \; \dfrac{\sqrt{3}\, U_2\, U_{2f}}{X}$;

sau: $Q_{2g} = \dfrac{E_d U_2}{X} \cos\delta \; \dfrac{U_2^2}{X}$

($\sqrt{3}\, E_{df} = E_d$ – tensiunea electromotoare intre faze)

Considerind E_d=ct (excitatia se mentine constanta, regulatorul de tensiune al generatorului nu lucreaza) si ca puterea absorbita de consumator (P_2) nu variaza, se poate trasa caracteristica$Q_g=f_1(U)$ dind diferite valori pentru U_2.

Din formula caracteristicii de putere a generatorului, $P_s = \dfrac{U_s E_d}{X} \sin\delta$, (unde $P_s = P_2$ si $U_s = U_2$) rezulta : $\sin\delta = P_2 X / U_2 E_d$ cu care se determina $\cos\delta$.

Formula caracteristicii $Q_c= f_2(U)$, numita caracteristica statica pentru puterea reactiva a consumatorilor, care arata cum variaza consumul de putere reactiva functie de variatia tensiunii, depinde de structura consumatorilor si de treapta de tensiune pentru care se stabileste. Pentru o impedanta constanta caracteristica statica se prezinta sub forma unei curbe de gradul doi, iar pentru o sarcina complexa in care ponderea o au motoarele electrice gradul curbei este de 1,5...2,5. In fig.10, $Q_c=f_2(U)$ reprezinta caracteristica statica a unor sarcini complexe.

Cele doua caracteristici se intersecteaza in doua puncte a si b, ambele putind fi puncte de functionare. Se considera punctul de functionare in punctul a, caruia ii corespunde tensiunea U_{2o} si puterea reactiva Q_{g2} si apare o perturbatie, care conduce la scaderea tensiunii pina la valaloarea U'_2. Puterea

reactiva care intra in nod (punctul a') este mai mare decit puterea ceruta de consumator (punctul a").

Excedentul de putere reactiva conduce la cresterea tensiunii U'_2 pina la U_{20} unde se restabileste echilibrul dintre cele doua puteri reactive ($Q_{g2} = Q_c$)

Daca tensiunea creste de la U_{20} la U''_2 (punctele a'_1 si a''_1), puterea reactiva care intra in nod este mai mica decit puterea reactiva consumata. Ca urmare a deficitului de putere care apare, tensiunea U''_2 scade ajungind la U_{20}, cind se restabileste echilibrul puterilor reactive. Rezulta deci, ca punctul a este de functionare stabila, deoarece la orice perturbatie punctul de functionare revine la punctul initial.

In mod analog, se demonstreaza ca punctul b este un punct de functionare instabila. Intradevar, daca tensiunea U_b (corespunzatoare punctului b) creste la U''_b, se constata ca apare un excedent de putere reactiva, ($Q_g > Q_c$) care conduce la cresterea in continuare a tensiunii pina in punctul a, punct in care $Q_g = Q_c$; daca tensiunea U_b scade la U'_b, corespunzator acestui punct, apare un deficit de putere reactiva ($Q_g < Q_c$), ceeace conduce la scaderea in continuare a tensiunii, urmata de cresterea deficitului de putere reactiva si respectiv scaderea tensiunii sub forma unei avalanse.

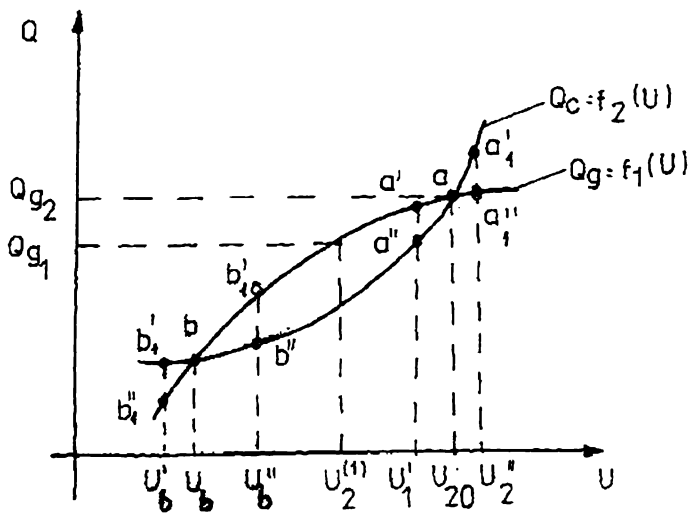


Fig. 10

Rezultatul acestui proces este pierderea stabilitatii nodului respectiv putind influenta functionarea sistemului. Din fig.10 reiese ca in intervalul a–b, curba puterii produse este deasupra curbei puterii consumate, rezultind un excedent de putere reactiva

$$\Delta Q = Q_g - Q_c ,$$

care are o valoare maxima pentru o anumita valoare a tensiunii, U_{cr} - tensiunea critica.

Daca in nodul considerat, consumul de putere reactiva creste fara sa se schimbe caracteristica Q_g, noul punct de functionare stabila se deplaseaza in a_1 (fig.11) corespunzator unei tensiuni de functionare U_{a1} mai mica decit U_a.

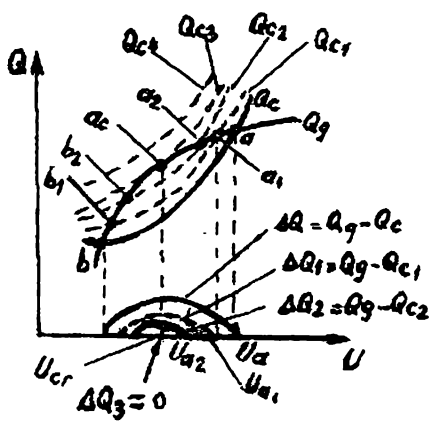


Fig. 11

De asemenea se reduce si rezerva de putere reactiva:

$\Delta Q_1 = Q_g - Qc_1$

Daca consumul continua sa creasca, caracteristica consumului se deplaseaza in pozitia Q_{c2}, punctul de functionare trece in a_2, la o tensiune U_{a2} mai mica si rezerva de putere reactiva scade si mai mult. Cind curba Q_c devine tangenta la curba Q_g in punctul a_c, care se confunda cu punctul instabil b, rezerva de putere devine zero. Valoarea tensiunii corespunzatoare acestei situatii se numeste tensiune critica si corespunde valorii maxime a rezervei de putere reactiva.

Trasind curbele $\Delta Q = Q_g - Q_c$ (fig.11) se constata ca stabilitatea este asigurata atunci cind punctul de functionare se gaseste in zona U_a–U_{cr}, adica pe portiunea ascendenta a curbelor $\Delta Q = f(U)$. Derivata dQ / dU intr–un punct oarecare la aceasta curba pe portiunea ascendenta, in care functionarea sistemului este stabila, este negativa si deci criteriul de stabilitate se prezinta sub forma:

$$\frac{d(\Delta Q)}{dU} < 0$$

Pentru valoarea maxima ΔQ, valoarea derivatei este zero si stabilitatea nu mai este asigurata; pe partea descendenta a curbei ΔQ derivata este pozitiva, rezulta ca nici in aceasta zona nu este

asigurata stabilitatea.

Daca se ia in consideratie nivelul tensiunilor, reiese ca functionarea este stabila intr–un nod, daca tensiunea reala in nodul respectiv este mai mare decit tensiunea critica.

Se poate stabili si un coeficient pe baza caruia sa se aprecieze rezerva de stabilitate:

$$K_Q = \frac{U_r - U_{cr}}{U_r} 100 ;$$

in care U_r este tensiunea reala in nodul respectiv.

In situatii normale, se poate considera ca stabilitatea este asigurata daca K_Q = 10 ... 15%.

Tensiunea critica se determina pentru fiecare nod al sistemului, dupa ce s–au stabilit cele doua caracteristici $Q_g = f_1(U)$ si $Q_c = f_2(U)$.

Din diferenta celor doua caracteristici rezulta: $\Delta Q = Q_g - Q_c$, iar pentru valoarea maxima a ΔQ corespunde tensiunea critica.

1.4. Influenta regulatorului de tensiune asupra stabilitatii statice dupa criteriul dQ / dU.

In analiza stabilitatii facuta dupa criteriul dQ / dU s–a considerat ca in timpul aparitiei unei perturbatii, regulatoarele de tensiune nu actioneaza si drept consecinta tensiunea electromotoare E_d a generatorului echivalent se mentine constanta.

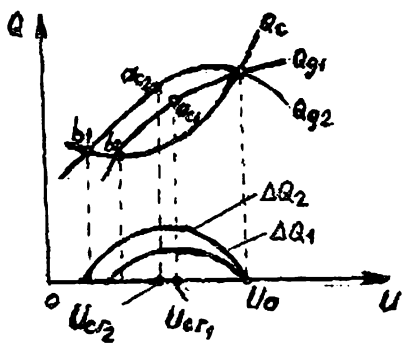


Fig. 12

Intrucit generatoarele sint prevazute cu regulatoare de tensiune si acestea intervin atunci cind tensiunea la borne scade, crescind curentul de excitatie si deci E_d, tensiunea se mentine constanta.

Q_{g1} – este caracteristica de putere reactiva a generatorului fara interventia regulatorului de tensiune;

Q_{g2} – caracteristica de putere reactiva a generatorului cu actionarea regulatorului de tensiune.

Prin actionarea regulatorului de tensiune (curba Q_{g2} deasupra curbei Q_{g1}) rezerva de putere $\Delta Q2$ este mai mare decit in primul caz cind este $\Delta Q1$ si totodata tensiunea U_{cr2} se deplaseaza spre valori mai mici ale tensiunii.

Aceasta conduce la imbunatatirea conditiilor de stabilitate, deoarece tensiunea in nodul respectiv poate scadea la tensiuni mai mici decit in cazul fara regulator de tensiune, fara ca stabilitatea sa fie periclitata (pina la U_{cr2}, punct pina la care curba ΔQ_2 este ascendenta).

2. Stabilitatea dinamica a sistemelor energetice

In sistemele energetice, in afara perturbatiilor mici si lente care exista permanent in functionare normala, pot apare perturbatii caracterizate prin variatii bruste si de mare amplitudine a unor marimi ale sistemului si care pericliteaza intr–o masura mult mai mare stabilitatea functionarii in paralel a generatoarelor.

Dintre acestea se pot mentiona :

– iesirea din functiune a unor linii de transport a energiei electrice;

– producerea unor scurtcircuite;

– suprasarcini bruste rezultate in urma unor debuclari a sistemului.

Aparitia acestor evenimente constituie un proces dinamic caracterizat prin variatii mari ale tensiunii si curentilor, printr–un schimb de puteri intre generatoare, denumite pendulari si cresteri ale unghiurilor de decalaj intre rotoarele diferitelor generatoare din sistem.

Stabilitatea dinamica a sistemului caracteristica pentru aceste procese tranzitorii, reprezinta capacitatea sistemului ca, in cazul aparitiei unor perturbatii bruste si de mare amplitudine, dupa disparitia acestora, sa gaseasca o noua situatie stabila de functionare continuind alimentarea consumatorilor. In cazul in care functionarea nu se stabilizeaza, fenomenele continuind sa se accentueze, variatiile de curent si tensiune devin mai intense, sincronismul centralelor nu mai poate fi asigurat si in aceasta situatie instalatiile de protectie si automatizare actioneaza separind sistemul in mai multe parti. Fiecare

parte din sistemul fragmentat are putine sanse sa revina la o functionare stabila.

In asemenea cazuri, sistemul devine instabil, consumatorii sint intrerupti si revenirea la situatia normala necesita un timp indelungat (de ordinul orelor).

Pentru astfel de situatii grele, se examineaza in prealabil stabilitatea dinamica in scopul gasirii si adaptarii solutiilor pentru evitarea lor.

2.1. Stabilitatea dinamica a unei centrale debitind pe barele unui sistem de putere infinita.

Pentru examinarea stabilitatii dinamice in acest caz, se considera o centrala a caror generatoare bloc cu transformatoare sint reprezentate printr–un grup echivalent generator–transformator si care debiteaza printr–o linie dublu circuit pe barele sistemului de putere infinita.

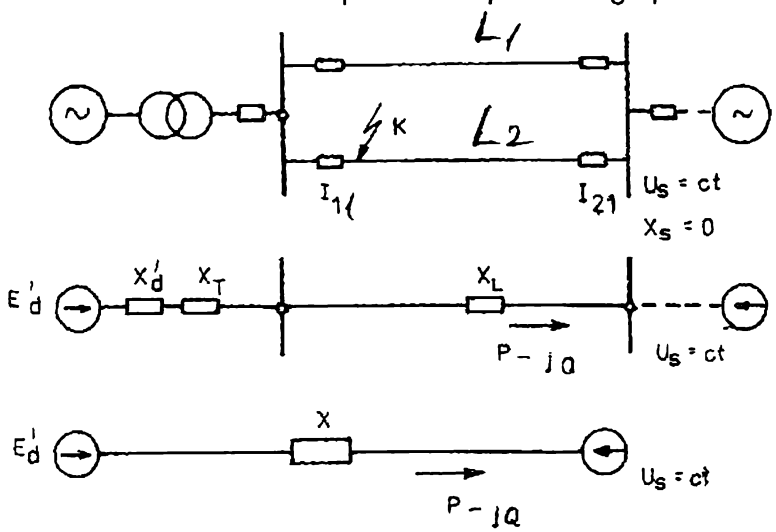


Fig. 13

Schema de principiu si echivalenta sint prezentate in fig.13 In schema echivalenta generatoarele sint reprezentate prin reactanta tranzitorie x'd si tensiunea electromotoare E'_d in spatele acestei reactante; transformatoarele prin X_T si linia prin reactanta echivalenta X_L.

Reactanta totala intre E'_d si U:

$$X = X'_d + X_T + X_L$$

Pentru schema considerata, se traseaza caracteristica de putere P=f(δ) pentru acest regim (Fig.14 – curba N)

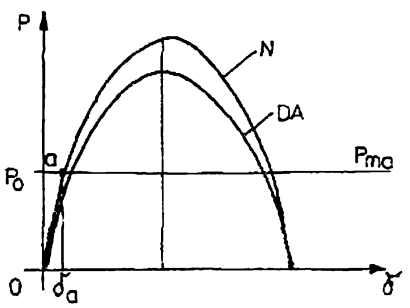


Fig. 14

Avind U_S = ct, reactanta totala X si puterea aparenta debitata de generator pe bare ale sistemului, se poate determina:

$$E'_d = \sqrt{\left(U_s + \frac{QX}{U_S}\right)^2 + \left(\frac{PX}{U_S}\right)^2} \qquad \text{(Stabilita la 1.3)}$$

$$\text{iar } tg\delta = \frac{\frac{PX}{U_S}}{U_S + \frac{QX}{U_S}}$$

ceeace permite stabilirea pozitiei punctului de functionare a, respectiv unghiul de decalaj δ_a.

Punctul de functionare a, arata ca centrala debiteaza in sistem o putere P avind un decalaj intre E'_d si U_S egal cu δ_a. Puterea P debitata de generator reprezinta dealtfel puterea la arborele turbinei, care antreneaza generatorul si va fi mentionata constanta in tot timpul procesului tranzitoriu; in timpul schimburilor care apar, regulatoarele turbinelor nu intervin si deci cantitatea de abur care intre in turbina este constanta, independent de unghiul δ.

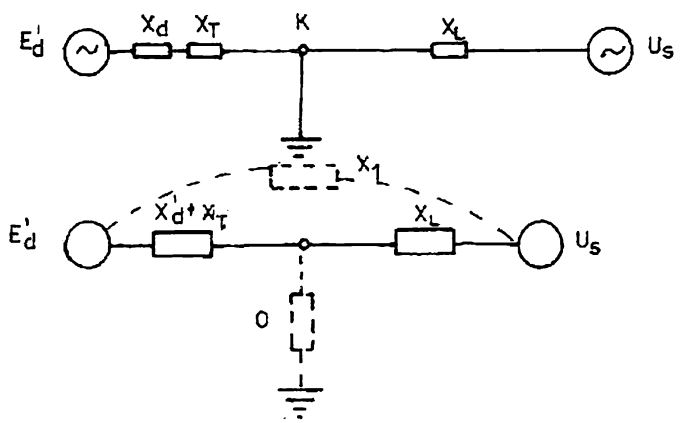


Fig. 15

Astfel, punctul de functionare inainte de momentul aparitiei avariei era "a" pe caracteristica de putere N din functionarea normala. Presupunem ca la un moment dat se produce un scurtcircuit trifazic pe una din linii, in punctul K, in imediata apropiere a barelor centralei. Schema

echivalenta in acest caz, este prezentata in fig.15 in care apare o legatura de rezistenta zero, la pamint (schema echivalenta a scurtcircuitului trifazic);

Reactanta dintre E'_d si U_s este prezentata de latura triunghiului rezultat din transfigurarea stelei create prin producerea scurtcircuitului trifazic:

$$X1 = (X'_d + X_T) + X_L + \frac{(X'_d + X_T)\, X_L}{0} = \infty$$

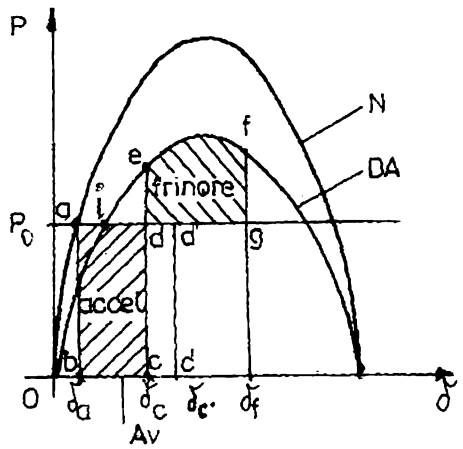


Fig. 16

ca urmare $P_{av} = \frac{E'_d\, U_s}{X_1} \sin\delta = 0$

Rezulta ca pe durata scurtcircuitului puterea electrica debitata de centrala este zero independent de valoarea lui δ, caracteristica de putere $P_{av} = f(\delta)$ este o dreapta care se confunda cu axa $O\delta$, fig.16.

Dupa un anumit timp, defectul este eliminat de protectia proprie a liniei defecte.

In acest caz reactanta dintre E'_d si U_s devine: $X_2 = X'_d + X_T + 2X_L$, unde $2X_L$ este reactanta liniei ramase in functiune. Intrucit se considera ca E'_d si U_s nu variaza nici in aceasta situatie, se poate stabili caracteristica de putere dupa avarie

$$P_{DA} = \frac{E'_2\, U_s}{X_2} \sin\delta$$

Comparind relatiile caracteristicilor de putere inainte si dupa avarie, se constata ca $P_{DA} = f(\delta)$, are amplitudinea mai mica, datorita faptului ca $X_2 > X$.

Sa urmarim comportarea generatoarelor pe durata scurtcircuitului si dupa eliminarea acestuia, pentru a stabili conditiile necesare ca dupa eliminarea defectului centrala sa revina la o functionare stabila.

In momentul producerii scurtcircuitului, punctul de functionare al generatorului echivalent se deplaseaza din punctul a de pe caracteristica normala, pe caracteristica de avarie $P_{av}=f(\delta)$, care asa cum s–a mentionat se confunda cu axa O δ (dreapta P=0) si anume in punctul b, corespunzindu–i aceluiasi unghi δ_a, deoarece din cauza inertiei rotoarelor, acestea isi mentin pozitia fata de cimpul statoric. Corespunzator acestui punct, puterea debitata de generator fiind zero iar admisia aburului in turbina a ramas constanta (regulatorul turbinei nu intervine), apare un cuplu accelerator proportional cu puterea mecanica ramasa constanta.

Ca urmare rotoarele generatoarelor incep sa se accelereze si in consecinta unghiul de decalaj δ_a creste pina in momentul eliminarii defectului punctul c, atingind valoarea δ_c.

Dupa inlaturarea defectului, punctul de functionare trece pe caracteristica $P_{DA} = f(\delta)$ in punctul e; unghiul de decalaj δ_c ramine acelasi din cauza inertiei rotoarelor.

In punctul de functionare e, puterea debitata de generatoare (segmentul c–e) este mai mare decit puterea mecanica a turbinei. Din acest motiv rotoarele generatoarelor incep sa se frineze si ca urmare unghiul δ scade. Scaderea unghiului δ, insa nu incepe din primul moment, deoarece pe durata scrutcircuitului rotoarele s–au accelerat, masele in rotatie acumulind o energie cinetica suplimentara proportionala cu suprafata abcd numita arie de accelerare; aceasta energie se consuma la trecerea functionarii pe caracteristica $P_{DA} = f(\delta)$ determinind cresterea in continuare a unghiului δ, dar cu o acceleratie care scade pina la zero in punctul f (unghiul ajunge la δ_f).

Punctul f se stabileste astfel incit aria *defg* numita de frinare, sa fie egala cu aria *abcd*, aria de accelerare.

Aria de frinare reprezinta energia consumata in perioada cind puterea electrica depaseste puterea mecanica si este egala cu energia acumulata in perioada de accelerare.

In punctul f, puterea generatoarelor este superioara puterii mecanice ceeace determina frinarea in continuare a rotoarelor, dar acum acceleratia este negativa si unghiul δ incepe sa scada.

Datorita inertiei rotoarelor, acestea continua sa sa frineze si la trecerea prin punctul i, punct de

echilibru al puterii electrice cu puterea mecanica, intrind din nou in zona de accelerare. Unghiul δ continua sa scada din ce in ce, pina la o anumita valoare, de la care incepe iar sa creasca trecind din nou prin punctul i.

Dupa citeva oscilatii in jurul acestui punct de echilibru, punctul de functionare se stabileste in punctul i.

In aceasta situatie centraia este stabila din punct de vedere dinamic, deoarece dupa inlaturarea defectului, regimul de functionare a redevenit stabil.

Din cele prezentate, se constata ca prin eliminarea defectului la un unghi δ_c , aria de accelerare *abcd* echilibrata de aria de frinare *defg* conduce la stabilirea punctului f pe caracteristica de putere dupa avarie, deasupra dreptei $P=P_{ma}$ (puterea electrica debitata de generatoare mai mare decit puterea mecanica) si ca urmare rotoarele continua sa se frineze, punctul de functionare deplasindu–se spre punctul de functionare stabil.

Daca eliminarea defectului intirzie de exemplu pina in punctul c', unghiul δ creste atingind valoarea $\delta_{c'}$; ($\delta_{c'}>\delta_c$) , aria de accelerare devine *abc'd'* mai mare decit aria *abcd*, necesitind o arie de frinare de asemenea mai mare.

Revenirea la o functionare stabila, dupa inlaturarea defectului, este posibila numai daca punctul determinat de egalitatea celor doua suprafete de accelerarea si frinare se situeasa deasupra dreptei P_0=ct. In cazul cind coboara sub aceasta dreapta, se ajunge din nou in faza de accelerare (puterea debitata de generatoare devine mai mica decit puterea mecanica) ceea ce va conduce la reaccelerarea rotoarelor si deci la cresterea in continuare a unghiului δ pina cind generatoarele vor iesi din sincronism si vor fi deconectate de protectie.

In acest caz stabilitatea dinamica a centralei nu mai este asigurata.

Rezulta deci ca, cu cit eliminarea defectului se face mai rapid (valori ale unghiului δ mai mici) cu atit este mai asigurata stabilitatea dinamica.

2.2. Influenta tipului de scurtcircuit asupra stabilitatii dinamice

Perturbatiile care conduc in cele mai multe cazuri la aparitia unor procese dinamice sint de natura scurtcircuitelor. Curentii care apar in aceste cazuri difera de la un tip de scurtcircuit la altul, functie de numarul de faze afectate si starea fata de pamint a scurtciruitului, ceeace conduce la diferente in privinta modului in care este influentata stabilitatea dinamica.

Pentru examinarea problemei se considera o centrala electrica ale carei grupuri generatoare conectate bloc cu transformatoarele sint reprezentate printr–un grup echivalent generator–transformator si care debiteaza pe o bara de putere infinita printr–o linie cu dublu circuit fig.17. In ipoteza ca in punctul k, situat pe unul din circuitele liniei in imediata vecinatate a barelor, dupa intrerupatorul I_1, se produc scurtcircuite :

a – trifazat;

b – bifazat cu punere la pamint;

c – bifazat;

d – monofazat.

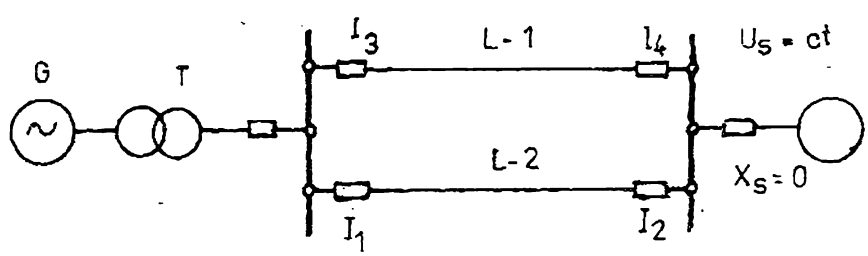
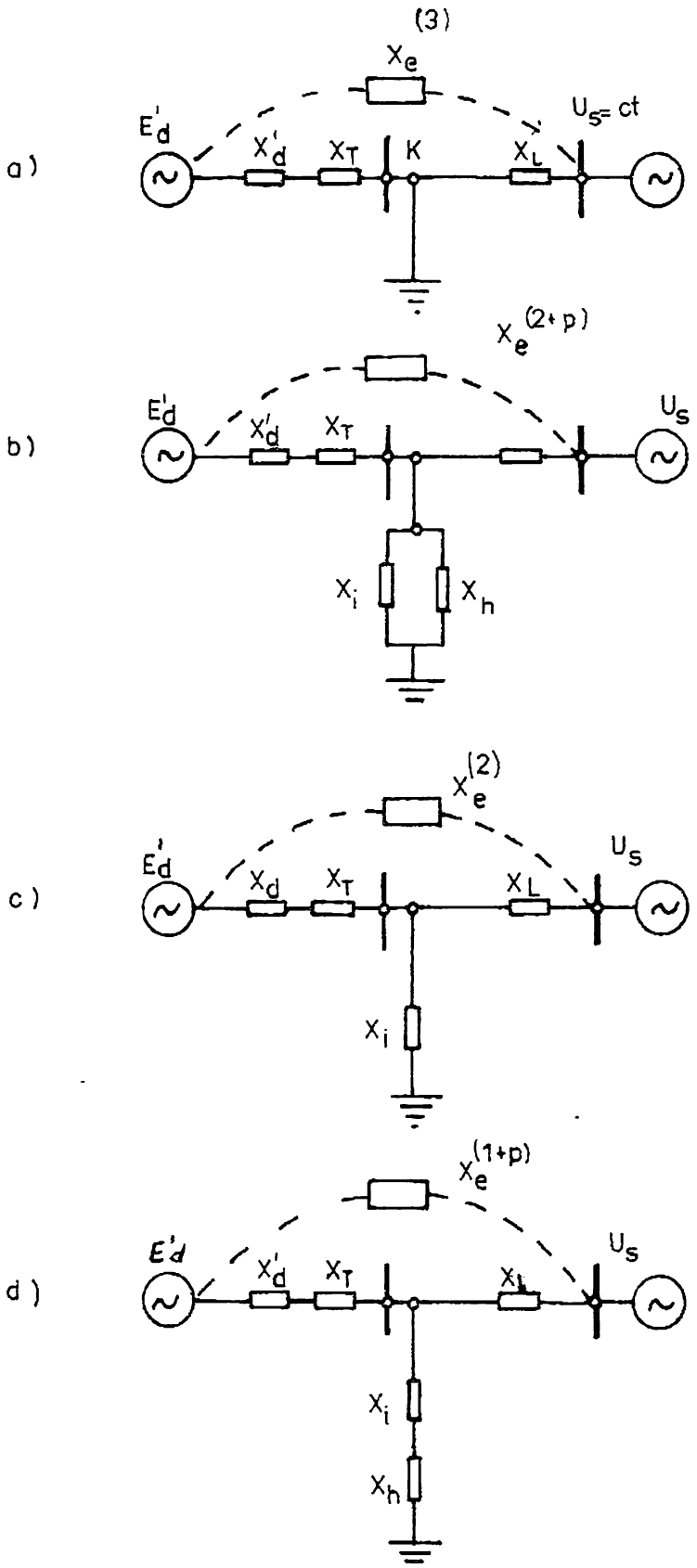


Fig. 17

Schemele echivalente corespunzatoare acestor tipuri de scurtcircuite sint reprezentate in fig. (18 a,b,c,d) In cazul scurtcircuitului trifazat, in punctul de defect, apare o legatura directa la pamint de rezistenta zero. Prin transfigurarea stelei, care se formeaza in toate cazurile de scurtcircuit, se obtin reactantele echivalente dintre E'_d si U_s, astfel:



– la sc trifazat: $X_e^{(3)} = (X'_d + X_T) + X_L + \frac{(X'_d + X_T)\, X_L}{0} = \infty$

– la sc bifazat cu punere la pamant: $X_e^{(2+p)} = (X'_d + X_T) + X_L + \frac{(X'_d + X_T)\, X_L}{X^{(2+p)}}$;

– la sc bifazat: $X_e^{(2)} = (X'_d + X_T) + X_L + \frac{(X'_d + X_T)\, X_L}{X_i}$;

– la sc monofazat: $X_e^{(1+p)} = (X'_d + X_T) + X_L + \frac{(X'_d + X_T)\, X_L}{X_i + X_h}$;

Expresia caracteristicii de putere, functie de natura scurtcircuitului, are forma:

– sc. trifazat: $P^{(3)} = \frac{E'_d\, U_s}{X_e^{(3)}} \sin\delta$;

– sc. bifazat cu punere la pamant: $P^{(2+p)} = \frac{E'_d\, U_s}{X_e^{(2+p)}} \sin\delta$;

– sc. bifazat : $P^{(2)} = \frac{E'_d\, U_s}{X_e^{(2)}} \sin\delta$;

– sc. monofazat: $P^{(1+p)} = \frac{E'_d\, U_s}{X_e^{(1+p)}} \sin\delta$;

Comparind expresiile reactantelor echivalente ale scurtcircuitelor analizate rezulta ca:

$X_e^{(3)} > X_e^{(2+p)} > X_e^{(2)} > X_e^{(1+p)}$

Pentru a constata in ce masura tipul scurtcircuitului influenteaza stabilitatea dinamica in cazul centralei debitind pe bare de putere infinita, se compara intre ele caracteristicile de putere corespunzatoare fiecarui tip de scurtcircuit in parte.

Astfel, daca in regim normal de functionare caracteristica de putere este N cu punct de functionare in a corespunzator puterii electrice debitate $P_0=P_m$, se pot trasa, pentru comparare si caracteristicile de putere corespunzatoare scurtcircuitelor examinate(fig.19).

Pentru scurtcircuitul trifazat in punctul K, caracteristica de putere este dreapta 1 (P=o) adica axa Oδ.

Puterea activa debitata fiind constant zero si puterea mecanica P_m deasemenea constanta, punctul de functionare trece din a in a $^{(3)}$ iar generatoarele se vor accelera, energia de accelerare fiind proportionala cu suprafata cuprinsa intre dreapta P_m si axa Oδ.

In cazul scurtcircuitului bifazat cu punere la pamint in K, caracteristica de putere 2 este o sinusoida a carei valoare maxima se obtine pentru $\delta = 90°$

Caracteristica 2 este deasemenea situata sub dreapta puterii mecanice P_m dar deasupra axei Oδ.

Punctul de functionare trece din a in a $^{(2+p)}$ si in acest caz generatoarele se accelereaza dar energia de accelerare, proportionala cu suprafata dintre sinusoida 2 si dreapta P_m, este mai mica decit in cazul scurtcircuitului trifazat.

In consecinta accelerarea generatoarelor va fi mai mica, unghiul δ va creste mai incet si sint conditii mai bune de asigurare a stabilitatii dinamice.

In cazul scurtcircuitului bifazat in acelasi punct K, caracteristica de putere 3, are valoarea maxima mai mare decit in cazul scurtcircuitului bifazat cu punere la pamint, intrucit $X_e^{(2)} < X_e^{(2+p)}$; punctul de functionare trece din a in a $^{(2)}$.

Aria de accelerare cuprinsa intre sinusoida 3 si dreapta P_m se micsoreaza si mai mult si deci unghiul δ creste mai incet decit la scurtcircuit bifazat cu punere la pamint, ceea ce reprezinta conditii mai usoare de mentinere a stabilitatii.

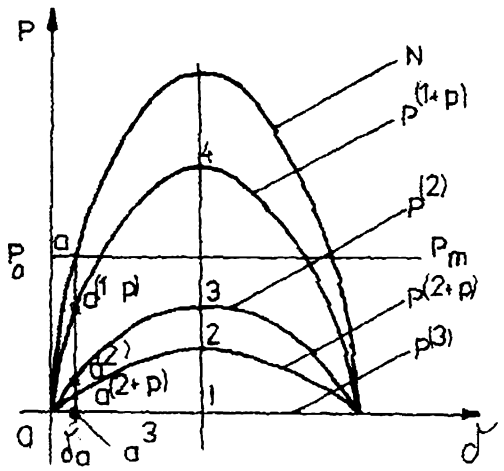


Fig. 19

Situatia cea mai usoara apare in cazul scurtcircuitului monofazat in acelasi punct k, pentru care caracteristica de putere 4 are valoarea maxima cea mai mare (numitorul $X_e^{(1+p)}$ avind valoarea cea mai mica); punctul de functionare trece din a in a $^{(1+p)}$ iar suprafata de accelerarea cuprinsa intre sinusoida 4 si dreapta Pm este mai mica decit in cazul precedent. Este posibil ca, in anumite situatii, aceasta caracteristica sa determine nu numai aria de accelerare ci si o arie de frinare (punctul de functionare sa se stabileasca deasupra dreptei P_m), ceea ce conduce la o imbunatatire suplimentara a conditiilor de stabilitate.

Se poate spune deci, ca in cazul cind in acelasi punct al retelei se considera ca apar succesiv diferite tipuri de scurtcircuit, pentru asigurarea stabilitatii dinamice, cele mai grele conditii le creaza scurtcircuitul trifazat, apoi cel bifazat cu punere la pamint urmat de cel bifazat, scurtcircuitul monofazat prezentind cele mai usoare conditii.

2.3. Imbunatatirea conditiilor de asigurare a stabilitatii.

2.3.1. Reducerea duratei scurtcircuitului.

Pentru imbunatatirea stabilitatii dinamice a unui sistem energetic este necesar, in multe cazuri, sa se ia o serie de masuri. Dupa cum a rezultat din analiza stabilitatii dinamice,masura cea mai eficace se poate considera reducerea duratei scurtcircuitului, adica deconectarea elementului avariat, intr–un timp cit mai scurt.

Aceasta inseamna protectii prin relee cit mai rapide si intrerupatoare cu timpi de lucru foarte redusi.

In acest fel se poate reduce mai mult aria de accelerare (fig.20), deoarece unghiul de deconectare are valori mici si in acest caz, aria de frinare necesara este mica si deci stabilitatea poate fi usor mentinuta.

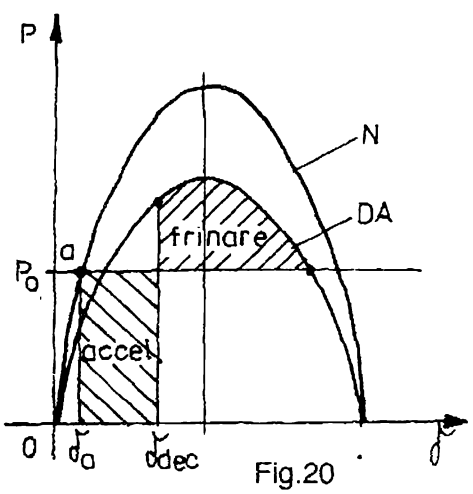


Fig.20

2.3.2 Reanclansarea automata rapida monofazata sau trifazata (RART sau RARM).

Pentru a analiza modul in care reanclansarea automata rapida contribuie la imbunatatirea stabilitatii dinamice, se considera schema din fig.21; o centrala care debiteaza pe barele unui sistem de putere infinita prin doua linii de interconexiune.

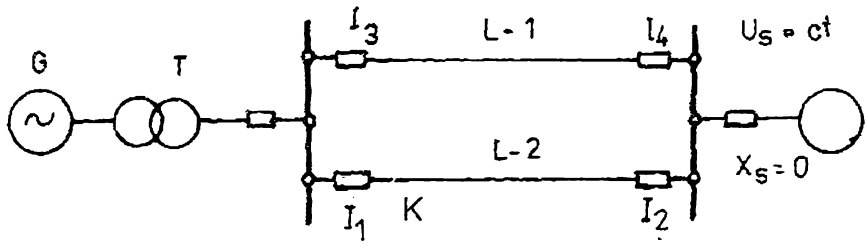


Fig. 21

In principiu RARM si RART consta in urmatoarele etape:

– aparitia scurtcircuitului monofazat sau trifazat in punctul K;

– deconectarea simultana la ambele capete numai a fazei defecte de catre polii de pe faza respectiva a intrerupatoarelor I_1 si I_2, in cazul scurtcircuitului monofazat; sau deconectarea simultana a intregului circuit (trifazat) de aceleasi intrerupatoare in cazul scurtcircuitului polifazat;

– mentinerea elementelor deconectate un anumit timp, in general sub o secunda, pentru a permite arcului care apare la locul defectului, sa se stinga; acest timp se numeste pauza de RAR;

– dupa pauza de RAR se reanclanseaza elementele deconectate (o faza la RARM sau cele trei faze la RART), revenind astfel la situatia de functionare normala (inainte de aparitia scurtcircuitului);

Daca arcul s–a stins, linia ramine in functiune si reanclansarea se considera reusita, iar daca pauza a fost scurta si arcul nu s–a stins, inseamna ca defectul nu a disparut si protectia comanda deconectarea definitiva a intrerupatoarelor elementului avariat. Acest caz constituie o reanclansare nereusita. In cazul in care apare un scurtcircuit bifazat in punctul K (fig.21) pentru care nu se foloseste RAR, punctul a de functionare in starea normala de pe caracteristica de putere 1, trece in punctul b de pe caracteristica de putere de avarie 2 la acelasi unghi δ_a.

Din cauza ca in punctul b de functionare, $P_m > P_e$, rotoarele generatoarelor se accelereaza, unghiul de defazaj crescind pina la valoarea δ_1 cind protectia deconecteaza linia defecta. Punctul de functionare trece pe curba 3 dupa avarie cu acelasi unghi δ_1. Pentru asigurarea stabilitatii, aria de accelerare trebuie sa fie egala cu aria de frinare, inainte de a intra iar in zona de accelerare (fig.22a, punctul f)

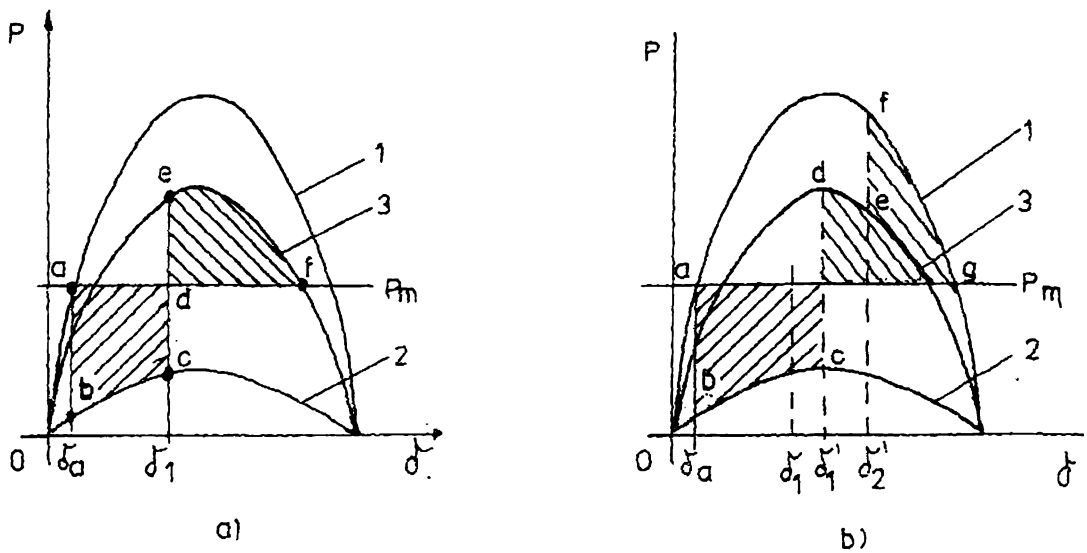


Fig. 22

In cazul folosirii RAR, dupa deconectarea liniei defecte (fig.21b) la unghiul δ'_1, punctul de functionare c (curba de avarie) trece in punctul d (curba dupa avarie). Unghiul continua sa creasca in timpul pauzei de RAR (rotoarele incep sa se frineze, acceleratia devine negativa, si viteza de crestere a unghiului δ se reduce continuu).

Dupa pauza de RAR la unghiul δ'_2, se reanclanseaza liniadeconectata. Punctul de functionare

trece din e in f pe curba de functionare normala la acelasi unghi δ'_2 si frinarea rotoarelor generatoarelor continua pina cind suprafata de frinare devine egala cu suprafata de accelerare.

Din fig. 21b se constata ca reanclansarea liniei dupa pauza de RAR la o valoare a unghiului δ'_2, prin trecerea punctului de functionare pe curba normala (punctul f), se mareste suprafata de frinare. Astfel, in aceasta situatie, se poate admite o suprafata de accelerare mai mare decit in cazul cind nu se foloseste RAR si cind suprafata de frinare este delimitata numai de curba de dupa avarie (suprafata de frinare fiind mai mica)

Rezulta ca valoarea unghiului de deconectare pentru care se asigura stabilitatea este mai mare (δ'_1) cind se foloseste RART, decit in cazul cind nu se foloseste (δ_1);

Consecinta este ca timpul de deconectare poate fi mai lung atunci cind se foloseste RART, fata de cazul cind nu se foloseste.

Aceasta conduce la conditii mai usoare pentru protectii, care pot actiona la timpi mai lungi, fara ca stabilitatea sa fie afectata.

2.3.3. Fortarea excitatiei generatoarelor.

Se considera schema din fig.21.

Presupunem ca la un moment dat apare un scurtcircuit pe linia 2, care determina trecerea punctului de functionare a de pe caracteristica normala, in punctul b pe caracteristica de avarie, cu acelasi defazaj δ_0(fig.23).

Scaderea brusca a tensiunii ca urmare a scurtcircuitului, conduce la fortarea excitatiei generatoarelor de catre regulatorul de tensiune sau de catre o instalatie separata de fortare a excitatiei.

Prin aceasta, curentul de excitatie creste la valoarea de plafon (aproapee de doua ori curentul nominal de excitatie), ceeace determina cresterea tensiunii electromotoare E_{do} la valoarea E_{d1}.

Se obtine astfel o noua caracteristica de putere (FE).

Punctul de functionare b' de pe caracteristica de avarie trece in punctul c de pe caracteristica FE la un defasaj δ_1.

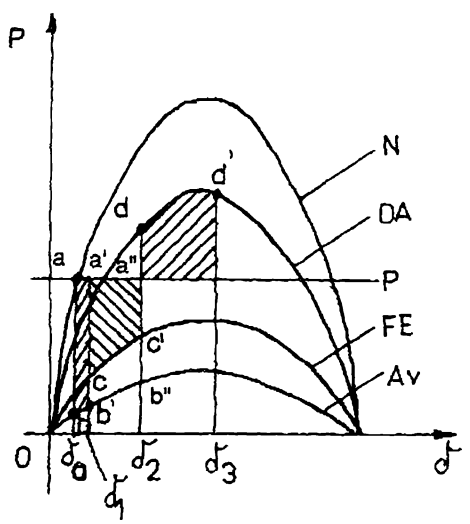


Fig. 23

In momentul in care protectia elimina defectul la un defazaj δ_2, punctul de functionare c' de pe caracteristica FE, trece in punctul d de pe caracteristica dupa avarie. Rotoarele generatoarelor se frineaza pina cind suprafata de frinare este egala cu suprafata de accelerare (punctul d').

Suprafata de accelerare *abb'a'* depinde de durata de la producerea scurtcircuitului pina la fortarea excitatiei si este cu atit mai mica cu cit viteza de actionare a regulatorului este mai mare.

Din fig.23 rezulta ca suprafata de accelerare in cazul fortarii excitatiei este mai mica, decit in cazul in care lipseste, cu suprafata *b'b"cc'*, ceeace necesita o suprafata de frinare, care sa o echilibreze, mai mica.

Ca urmare, cresterea unghiului de defazaj este mai mica in cazul fortarii excitatiei.

Rezulta ca fortarea excitatiei generatoarelor, in momentul producerii scurtcircuitului sau oricarei alte perturbatii insotita de scaderi bruste de tensiune, conduce la imbunatatirea conditiilor de mentinere a stabilitatii dinamice.

Verificat: dr.ing.T. Popa

BIBLIOGRAFIE

BERCAVICI M si altii — Retele electrice. Calculul electric. Editura Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1975.

HORTOPAN Gh. — Aparate electrice. Editura didactica si pedagogica, Bucuresti, 1972.

IACOBESCU Gh si altii — Retele si sisteme electrice Editura didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1979.

IACOBESCU Gh si altii — Retele electrice. Editura Didactica si pedagogica, Bucuresti 1981.

MIHOC D — Automatizari in energetica. Editura Didactica si pedagogica, Bucuresti 1979.

Ulianov S A — Regimuri tranzitorii ale sistemelor electrice. Editura Tehnica, Bucuresti 1967